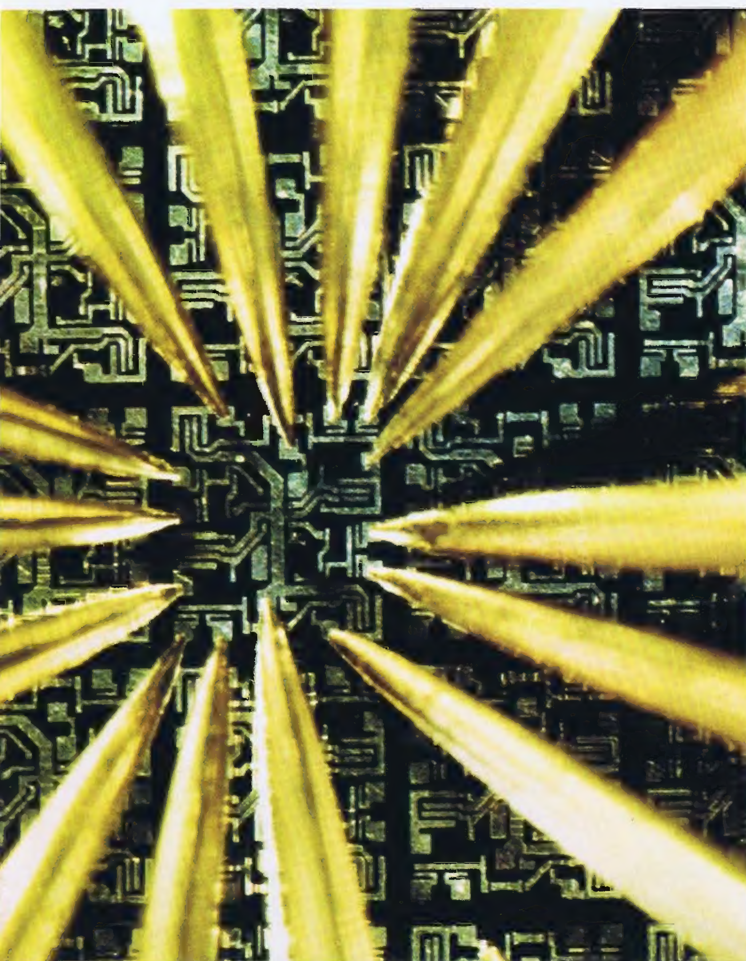
PHILIPS

8

halfgeleiders



WIJ EN DE ELEKTRONICA

HALFGELEIDERS

Dat elektriciteit zich zo nuttig laat gebruiken, is voor een groot deel te danken aan het bestaan van materialen met zeer uiteenlopende eigenschappen. Met behulp van geleidende stoffen zoals koper, aluminium, enz. kan men elektriciteit brengen daar waar men dat wenst en door middel van isolerende stoffen zoals porselein, plastiek, enz. er juist voor zorgen dat deze niet op ongewenste plaatsen komt. Tussen de geleiders en isolators in liggen de halfgeleidende stoffen. Zoals de naam reeds suggereert, geleidt een halfgeleider de elektrische stroom minder goed dan de geleiders, doch beter dan de isolators. Reeds in de beginjaren werd in de radiotechniek vóór de komst van de „radiolampen" gebruik gemaakt van halfgeleiders. Een kristal van loodglans waarop een metalen spits gedrukt was, diende als gelijkrichter in de primitieve radio-ontvanger. Met een dergelijke „kristal-ontvanger", voorzien van een hoofdtelefoon, kon men zonder batterij naar een klein aantal zenders luisteren. De veel grotere mogelijkheden van de elektronenbuizen, die al spoedig tot ontwikkeling kwamen, drongen de halfgeleiderkristallen snel op de achtergrond. Doch in de laatste oorlog zijn er weer heel wat kristalontvangers in verborgen hoekjes in bedrijf geweest voor de „verboten" ontvangst van Radio Oranje en van Herrijzend Nederland.

Tezelfdertijd vond de kristalgelijkrichter ook toepassing in de radartechniek. Deze opbloei is het voorspel geweest van een lawine-achtige ontwikkeling. Men leerde halfgeleidende stoffen zuiveren en op heel speciale manier bewerken. Daaruit volgden nieuwe produkten zoals de temperatuurgevoelige weerstand, de lichtgevoelige weerstand, de kristaldiode en de thans beroemde transistor.

De eigenschappen van de geleiders, halfgeleiders en isolators worden bepaald door de bouw van de kristallen, moleculen en atomen waaruit zij bestaan. Wij zullen ons daarom nu eerst gaan verdiepen in deze submicroscopische wereld.

← *Dank zij de ontwikkeling van halfgeleiders is de fabricage van geïntegreerde schakelingen mogelijk geworden en zijn we het tijdperk van de micro-miniaturisatie ingegaan*

De bouw van het atoom

Op blz. 3 van het deel „Elektronenbuizen" is reeds iets gezegd over de deeltjes waaruit een atoom zelf weer bestaat: een positieve kern met daaromheen wentelend onderling gelijke, negatieve elektronen. Elke atoomsoort heeft een eigen aantal elektronen: één voor waterstof, twee voor helium, enz ... 92 voor uranium en 103 voor lawrencium. De kern heeft een even grote positieve lading als de negatieve van alle elektronen tezamen. De elektrische aantrekking tussen deze tegengestelde ladingen houdt de deeltjes bij elkaar tot één elektrisch neutraal geheel. Hoe de kern is samengesteld, laten we hier buiten beschouwing.

Men zou verwachten dat deze neutraliteit zich ook in het gedrag der atomen onderling uit. Het wonderlijke is nu dat slechts enkele soorten een strikte neutraliteit handhaven; deze atomen gaan geen bindingen aan met andere atomen, zelfs niet van eigen soort. Men noemt ze daarom „edel" en omdat ze gasvormig zijn, edelgassen. De andere atomen zullen zich echter, ondanks hun neutraal zijn, onderling verbinden tot grotere atoomgroepen, b.v. moleculen. Ook kunnen kristallen ontstaan door ordelijke rangschikking van zéér vele atomen.

Edelgassen zijn dus stoffen die bestaan uit enkelvoudige, losse atomen welke zich als het ware te ver boven andere atomen verheven voelen om zich daarmede te verbinden. Er zijn zes edele atoomsoorten: helium met 2 elektronen, neon met 10, argon met 18, krypton met 36, xenon met 54 en radon met 86 elektronen.

De verklaring van de bijzondere eigenschap van de edelgasatomen kan niet in enkele woorden worden gegeven. Het staat in verband met het feit dat in alle atomen de banen waarin de elektronen kunnen lopen, onderverdeeld zijn in groepen of schillen, elk met plaats voor een bepaald aantal elektronen. De eerste schil bevat de binnenste banen, de volgende meer naar buiten gelegen banen, enz. Hoeveel banen werkelijk door elektronen bezet zijn, hangt af van de atoomsoort. De binnenbanen hebben daarbij de voorkeur, de binnenste schillen zijn het eerst vol.

In de rij der atoomsoorten nemen de edelgasatomen een zeer speciale plaats in doordat bij deze alle gebruikte schillen (op een bepaalde manier) vol zijn met elektronen. Dit „vol" zijn resulteert blijkbaar in het „edel" zijn van de soort. De atomen

Fig. 1. Vereenvoudigd atoommodel van:

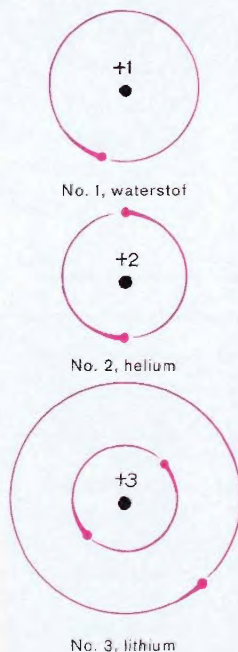
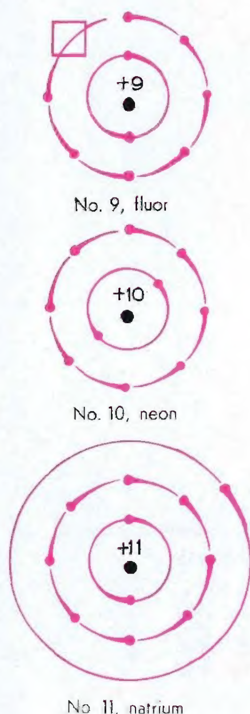


Fig. 2. Vereenvoudigd atoommodel van:



No. 9, fluor

No. 10, neon

No. 11, natrium

die in deze reeks direct voorafgaan aan de edele, hebben één elektron minder in de buitenste schil. De schil is dus niet vol. Zo zijn er ook atomen met twee elektronen „te weinig", enz.
De atoomsoorten die in de reeks direct volgen op de edele soorten, bezitten één enkel elektron dat rondloopt buiten de volle schillen. Vergeleken met de edele atomen bevatten zij een elektron „te veel". Zo zijn er ook atomen met twee elektronen „te veel", enz.
Men dient wel te bedenken, dat dit „te veel" en „te weinig" alleen geldt bij de vergelijking met de edelgasatomen. Alle atomen zijn elektrisch neutraal. Neemt men een ander atoom, b.v. met meer elektronen, dan krijgt men ook een atoomkern met een evenveel grotere positieve lading. Als voorbeeld zijn in figuur 2 drie opeenvolgende atomen getekend en wel van fluor, neon (edelgas) en natrium.
We kunnen nu alle atoomsoorten rangschikken in een aantal groepen: edele atomen en atomen met één, twee, drie, enz. elektronen „te veel" òf „te weinig" (zie fig. 3).

De ionenbinding

Het blijkt dat elk atoom met „te weinig" elektronen de neiging heeft zoveel elektronen op te nemen als nodig is om ook de buitenste schil vol te maken. Hierdoor ontstaat een atoom dat, wat de buitenkant betreft, „edel" is; een edelgasatoom is het echter niet geworden. De atoomkern is namelijk niet ver-

Fig. 3. Een gedeelte van het z.g. periodieke systeem der elementen

„te weinig"					edel	„te veel"	
−5	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2
				1 H	2 He	3 Li	4 Be
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 A	19 K	20 Ca
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr

A = argon	Ca = calcium	K = kalium	O = zuurstof
Al = aluminium	Cl = chloor	Kr = krypton	P = fosfor
As = arsenicum	F = fluor	Li = lithium	Rb = rubidium
B = borium	Ga = gallium	Mg = magnesium	S = zwavel
Be = berillium	Ge = germanium	N = stikstof	Se = selenium
Br = broom	H = waterstof	Na = natrium	Si = silicium
C = koolstof	He = helium	Ne = neon	Sr = strontium

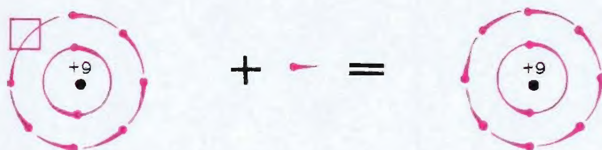


Fig. 4. Een neutraal fluoratoom plus een elektron geeft een negatief fluorion

anderd (zie figuur 4); wat ontstaan is, is een negatief geladen atoom, een zogenaamde negatief ion. Evenzo zullen atomen met „teveel" elektronen dit „teveel" gaarne afstaan (fig.5). Hier ontstaan dan positieve ionen die, evenals de negatieve ionen, uitsluitend volle schillen bezitten. De kernen zorgen echter voor een overmaat aan positieve lading. Het laat zich gemakkelijk raden wat er gebeurt als gelijke aantallen fluoratomen (no. 9) en natriumatomen (no. 11) bij elkaar komen. De Na-atomen geven elk een elektron af aan een F-atoom. Er ontstaan hierdoor positieve Na-ionen en negatieve F-ionen die elkaar elektrisch aantrekken. Te zamen vormen zij een kristal van natriumfluoride (Na F), een keurig gerangschikte opeenstapeling van vele miljoenen ionen, van beide soorten evenveel. Neemt men chloor (no. 17) in plaats van fluor, dan ontstaat op precies dezelfde wijze natriumchloride (Na Cl), beter bekend onder de naam keukenzout. Ook magnesium (no. 12) zal zich met chloor (no. 17) verbinden. Alleen zal er, daar Mg-atomen elk twéé elektronen te veel hebben, het dubbele aantal Cl-atomen beschikbaar moeten zijn; men verkrijgt dan magnesiumchloride ($Mg\ Cl_2$). Zo kan men verder gaan.

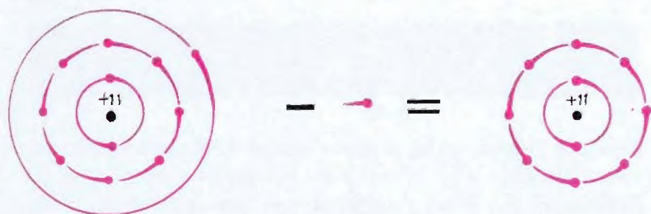


Fig. 5. Een neutraal natriumatoom minus een elektron geeft een positief natriumion

In al deze voorbeelden is sprake van de zgn. ionenbinding. Het is gemakkelijk in te zien dat alle stoffen, op deze wijze opgebouwd, isolators moeten zijn. Alle elektronen zitten namelijk in volle schillen en zijn daardoor heel stevig vastgebonden. Vrije elektronen zijn er niet; er kan geen elektronenstroom, dus ook geen elektrische stroom optreden.

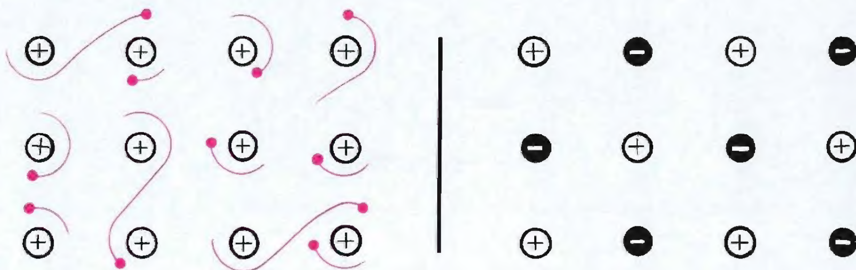


Fig. 6. Na is een geleider; NaCl is een isolator

De metaalbinding

Een ander soort binding van atomen tot een kristal vindt men in de metaalbinding. Na-atomen b.v., elk met een elektron „te veel", kunnen zich verenigen tot een kristal. Op blz. 3 van deel 2, Elektronenbuizen, is verteld, dat deze buitenelektronen zich in het materiaal zeer vrij bewegen en daardoor het optreden van een elektronenstroom mogelijk maken. Elk metaal is dus een geleider.
Men vergelijke nog eens een Na-kristal met een NaCl-kristal. De elektronen die in het metaal vrij bewegen, zijn in het keukenzout alle opgevangen door de Cl-atomen (fig. 6).

De covalente binding

Tenslotte bespreken wij nog een derde bindingsmogelijkheid tussen atomen, de zgn. covalente binding. Wat doen b.v. zuurstofatomen (no. 8) om hun tekort van twee elektronen in de buitenste schil op te heffen? Het antwoord is uitgebeeld in

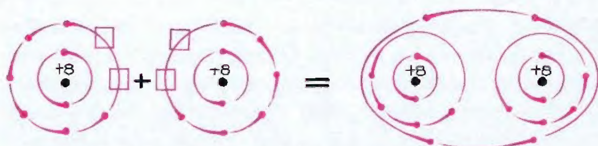


Fig. 7. Twee zuurstofatomen geven een zuurstofmolecuul

fig. 7. Twee atomen werken telkens samen, waarbij elk twee van de acht elektronen beschikbaar stelt voor gemeenschappelijk gebruik. Het resultaat is een zuurstofmolecuul waarin om elk van de twee atoomkernen toch tien elektronen wentelen, zes geheel eigen elektronen en vier gemeenschappelijke. De schillen zijn weer vol!
Zo zijn er meer stoffen met covalent gebonden atomen. Ook dit zijn isolators, daar alleen volle schillen aanwezig zijn.
En dan is het ogenblik daar om over germanium (no. 32) te spreken, de stof die met silicium (no. 14) in dit boekje de hoofdrol zal spelen. Elk atoom treedt in wisselwerking met vier andere door het beschikbaar stellen van vier elektronen voor gemeenschappelijk gebruik (fig. 8). Om elk germanium-atoom draaien zodoende 36 elektronen (krypton no. 36!), 28 geheel in eigen bezit en 4 × 2 gemeenschappelijk. Elke zwarte stip in de figuur stelt een germaniumkern voor, te zamen met deze 28 eigen elektronen, dus met een totale lading $+32 - 28 = +4$.
Omdat de vier buren elk ook weer vier buren hebben, ontstaat geen klein molecuul zoals bij zuurstof, doch bij verdere opbouw, een uitgebreid kristal. Het is niet verwonderlijk dat de kristalvorm zowel voor germanium als silicium dezelfde is als van koolstof. Alleen volle schillen komen voor; de atomen zijn covalent gebonden.

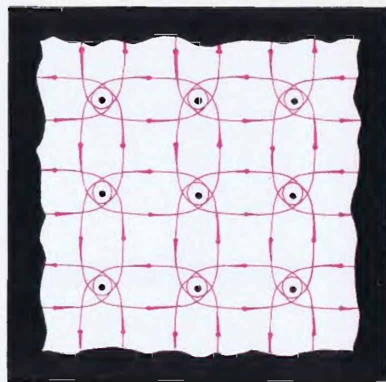


Fig. 8. Vele germanium-atomen vormen te zamen een germaniumkristal

Halfgeleidende stoffen

De conclusie ligt voor de hand dat germanium een niet-geleider is. Inderdaad is het bij zeer lage temperatuur een ideale isolator. Zodra men de stof echter verwarmt, gaan de kristaldeeltjes heftiger trillen, waardoor elektronen uit de bindingen los geslagen kunnen worden.
Hoe hoger de temperatuur, hoe meer vrije elektronen op deze manier ontstaan. Vergeleken met een metaal is het aantal vrije elektronen echter zeer gering: bij kamertemperatuur is er slechts één vrij elektron op de miljard atomen, terwijl bv. bij het metaal natrium één vrij elektron per atoom voorkomt, ongeacht de temperatuur. Dit aantal neemt bij germanium bij stijgende temperatuur snel toe, dus ook het geleidingsvermogen. Op dit principe berusten de zgn. N.T.C.-weerstanden (negatieve temperatuurcoëfficiënt) die o.a. als temperatuur-

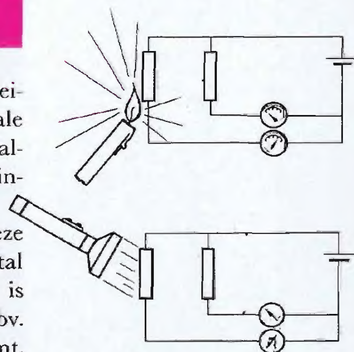


Fig. 9. Temperatuur of licht kunnen de weerstand van een halfgeleider beïnvloeden

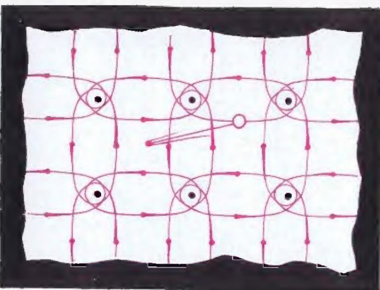


Fig. 10. Als een elektron een binding verlaat, ontstaat een vrij elektron en een gat

aanwijzer toepassing vinden.
Ook kent men de lichtgevoelige weerstand. Licht vertegenwoordigt energie en als licht op een halfgeleider valt, zullen daarin vrije elektronen ontstaan. Door het opvallen van licht krijgt de stof dus geleidingsvermogen. De toepassing als aanwijzer voor verlichtingssterkte ligt voor de hand. Als de lichtwerking niet gewenst is, sluit men het germanium lichtdicht op.

Vrije elektronen en gaten

Door toevoer van energie (warmte of licht) kunnen dus elektronen in halfgeleiders uit hun kristalbindingen worden losgeslagen tot vrije elektronen. Er is echter meer. Op de betreffende plaats in het kristal blijft nl. een open plek, een zgn. gat achter (zie fig. 10). Zo'n gat kan nu gevuld worden door het overspringen van een elektron uit een der vele andere kristalbindingen. Energie kost dit niet, daar er evenveel energie vrij komt bij het inspringen als er voor het uitspringen nodig is. Tegenover het verdwijnen van een leegte op de ene plek staat het ontstaan van een nieuw gat elders: het gat heeft zich verplaatst. Dit zal zich natuurlijk kunnen herhalen. Het gat zal dus door het kristal heen bewegen en wel net zo lang totdat toevallig het vrije elektron de leegte die het gecreëerd heeft, weer opvult. Men kan het gedrag van zo'n gat — het ontbreken van een elektron — het gemakkelijkst beschrijven als de beweging van een positief deeltje. Ter toelichting nog het volgende: wanneer we op de volle parkeerplaats in fig. 11 de auto *A* b.v. met een kraan wegnemen, ontstaat er

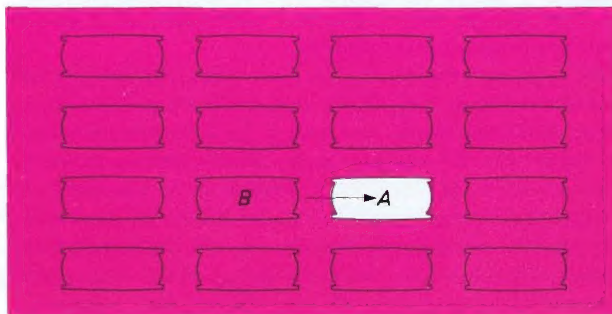


Fig. 11. Wanneer de auto B oprijdt, verplaatst het gat zich naar links

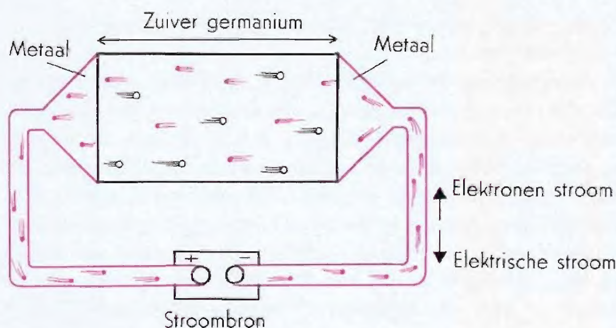


Fig. 12. Geleiding in zuiver germanium

een open plaats. Rijdt auto *B* nu naar rechts, dan verplaatst dit gat zich naar links. Hiermee kan men doorgaan; het gat verplaatst zich over de parkeerplaats, net zolang totdat men de „vrije" auto *A* weer op de open plaats neerzet.
Tussen de vorming van elektronen en gaten (generatie) en hun hereniging (recombinatie) ontstaat in het germanium een evenwicht waarbij het aantal werkelijk aanwezige gaten en vrije elektronen constant is. Dit aantal is groter naarmate de temperatuur hoger is.
In een zuiver germaniumkristal lopen dus evenveel vrije, negatieve elektronen als positieve gaten. Legt men een elektrische spanning over het kristal aan door verbinding van de uiteinden met de klemmen van een batterij (zie fig. 12), dan loopt er behalve een (negatieve) elektronenstroom naar links ook een (positieve) gatenstroom naar rechts. Beide dragen bij tot wat men de „doorgaande elektrische stroom" noemt. Dat elektronen een elektrische stroom kunnen vormen, wisten we reeds. Nieuw is dat een elektrische stroom ook door gaten kan worden gedragen.

N-germanium

In het voorafgaande is gedacht aan heel zuiver germanium met ten hoogste enkele vreemde atomen per tien- of honderdmiljoen germaniumatomen. Voor het bereiken van een dergelijke zuiverheid — ter vergelijking: één vreemdeling in onze gehele natie — moeten heel speciale zuiveringstechnieken gebruikt worden, die wij hier echter niet kunnen bespreken. Kristaldiodes en transistors bestaan nu uit germanium dat een geringe hoeveelheid vreemde atomen van een bepaal-

de soort bevat, die er met opzet in precies afgepaste mate in aangebracht is.
In *N*-germanium is ongeveer één op de miljoen germaniumatomen vervangen door een atoom uit de groep met een elektron meer in de buitenste schil, bv. arsenicum (no. 33, zie blz. 4). Deze vreemde atomen trachten zich zo goed mogelijk in het kristal in te passen. Daarbij blijft per atoom telkens één elektron over, dat niet in de kristalbindingen opgenomen kan worden; het is „te veel". Het gevolg is het ontstaan van zwervende, vrije elektronen. Deze vreemde atomen noemt men donors (= gevers); ze hebben elk een vrij elektron afgegeven en zijn dus zelf positieve ionen geworden. *N*-germanium bevat dus vrije elektronen — evenveel als er donors zijn — die, net zoals in metalen, elektriciteitsgeleiding mogelijk maken. Gaten zijn er nauwelijks, daar deze snel gevuld worden door de talrijke vrije elektronen.
Wij wijzen er op dat *N*-germanium uit complete neutrale atomen opgebouwd is en dus zelf ook elektrisch neutraal is. Immers, behalve de vrije elektronen, zijn er de vast op hun plaats staande positieve donorionen.

P-germanium

Men kan in zuiver germanium ook atomen brengen van de groep met vijf elektronen „te weinig", b.v. gallium (no. 31). Dit heeft tot gevolg dat bij de inpassing daarvan in de kristalbindingen per atoom telkens één elektron te weinig aanwezig is.

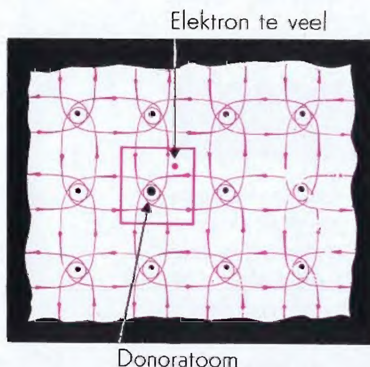


Fig. 13. N-germanium



Fig. 14. P-germanium

Er is daar dus een gat. Zo'n vreemd atoom, dat gemakkelijk een elektron accepteert (= aanneemt) en dus elders een gat veroorzaakt, noemt men een acceptor. In dergelijk *P*-germanium (*P* wijst op de positieve ladingdragers) komen dus veel gaten voor die zich als zwervende positieve deeltjes gedragen. Elektriciteitsgeleiding vindt hier door een gatenstroom plaats. Vrije elektronen zijn er nauwelijks, daar deze direct opgeslokt worden door de talrijke gaten. Ook *P* germanium is elektrisch neutraal. Tegenover de positieve lading van de beweeglijke gaten staat nl. de negatieve van de vaste acceptor-atomen, die door het opnemen van een elektron, negatieve ionen geworden zijn.

Combinatie van N- en P-geleiders

Tot nu toe is uitsluitend gesproken over het geleidingsvermogen van halfgeleiders en hoe dit beïnvloed kan worden. Ook zagen wij dat behalve elektronengeleiding, zoals in metalen en in *N*-germanium, ook geleiding door gaten mogelijk is in *P* germanium. Het grote belang van de halfgeleiders ligt hier echter niet in. Eerst de *combinatie* van een *elektronengeleider* met een *gatengeleider* blijkt de bijzondere effecten te doen ontstaan die de halfgeleiders beroemd gemaakt hebben. Dergelijke combinaties zijn b.v. de kristaldiode met het gelijkrichteffect en de transistor, die als versterker kan worden gebruikt. De volledige verklaring van deze effecten is zeer moeilijk. Wij zullen trachten op eenvoudige wijze een inzicht te geven.

De kristaldiode

De kristaldiode bestaat uit een enkel gezuiverd germaniumkristal dat op een heel speciale wijze bewerkt is. Het zou ons te ver voeren deze bewerking te beschrijven. De ene helft bevat donoratomen en is dus *N*-Ge, terwijl de andere kant *P*-Ge is door de aanwezigheid van acceptors. Twee gebieden zijn dus te onderscheiden: het ene met gaten, het andere met vrije elektronen. Deze merkwaardige situatie geeft aanleiding tot een bijzonder effect.

Er zullen namelijk vrije elektronen zijn die na een lange zwerftocht door het eigen gebied — het *N*-Ge — de grens

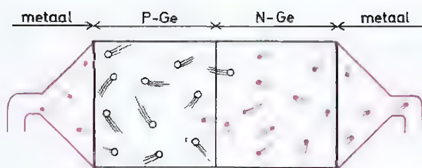


Fig. 15. Grensverkeer van de vrije elektronen en gaten

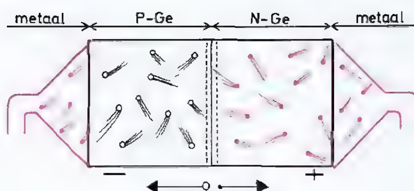


Fig. 16. Het overgangsgebied bij de grens tussen P- en N germanium

overschrijden en in het *P*-gebied komen (zie fig. 15). Een lang leven is zo'n elektron in de vreemde omgeving niet beschoren. Een ontmoeting met één van de vele gaten maakt een eind aan zijn bestaan. Het enige resultaat is dat het *N*-gebied door het verlies van een elektron een kleine positieve lading krijgt en het *P*-gebied een negatieve door het verlies van een gat.

Precies ditzelfde resultaat wordt bereikt wanneer een gat uit het *P*-germanium de grens overdwaalt. In het *N*-gebied gekomen, zal het spoedig een vrij elektron ontmoeten en daarmee recombineren. Hoe meer elektronen en gaten over de grens dwalen om dan te verdwijnen, hoe sterker positief het *N*-gebied en negatief het *P* gebied wordt en hoe groter de afstotende werking op nieuwe binnendringers.

Aan dit grensverkeer van gaten en elektronen komt zodoende na enige tijd automatisch een einde. Tussen de twee gebieden heerst dan een bepaald spanningsverschil, de zgn. contactpotentiaal. Deze bedraagt ongeveer 0,5 V. Door de afstotende werking ontstaat bij de grens een overgangsgebied waarin geen enkele beweeglijke ladingdrager, gat noch vrij elektron, rondloopt (zie fig. 16). Natuurlijk zijn er in deze laag wel de onbeweeglijke geladen donor- resp. acceptor-ionen. Hun aanwezigheid zonder bijbehorende vrije ladingdragers gaat samen met het bestaan van het spanningsverschil over de grenslaag.

De kristaldiode als ventiel

Wij nemen de kristaldiode nu op in een schakeling, zoals in fig. 17 getekend. De pluspool van de stroombron maakt het *N*-gebied waarmede deze verbonden is, nog sterker positief en de minpool het *P*-gebied nog sterker negatief. De afstoten-

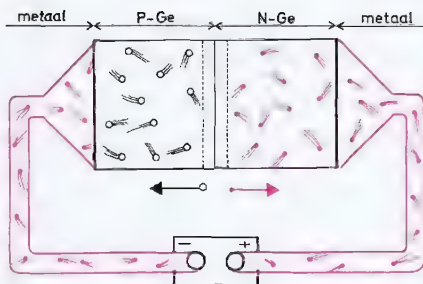


Fig. 17. Diode geschakeld in keerrichting

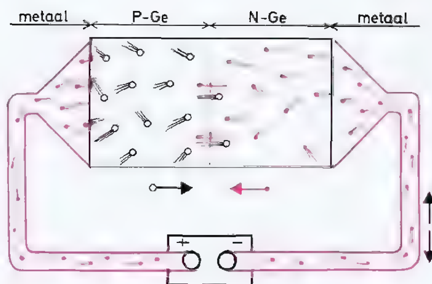


Fig. 18. Diode geschakeld in doorlaatrichting

de werking die de gaten en vrije elektronen van de grens af dreef, wordt eveneens sterker. Dit heeft een verbreding van de „lege" grenslaag ten gevolge. Er ontstaat daarover een grotere spanning.
Er wordt zodoende een nieuw evenwicht bereikt, waarin noch een gatenstroom, noch een elektronenstroom optreedt. De kristaldiode laat dus geen stroom door, ondanks de aanwezigheid van een stroombron in de keten. Op deze wijze aangesloten is de diode niet-geleidend.
Gemakkelijker is in te zien wat er gebeurt als de aansluitingen op de stroombron worden verwisseld (fig. 18). Het spanningsverschil tussen de *P*- en *N*-gebieden wordt nu verlaagd. Terwijl in het voorafgaande de vrije ladingdragers uit de grenslaag weggetrokken werden, worden ze er nu juist naar toe geduwd. Gaten uit het *P*-gebied ontmoeten bij de grens vrije elektronen uit het *N*-gebied, waarbij ze door recombinatie verdwijnen. Nieuwe elektronen en gaten stromen toe met hetzelfde resultaat. Nog meer volgen, enz. enz. Een eind komt er niet aan. De stroombron pompt nieuwe elektronen rechts in het *N*-gebied en zuigt links uit het *P*-gebied elektronen weg, waardoor aldaar nieuwe gaten ontstaan. Zo kan dit stromen van gaten naar rechts en van elektronen naar links willekeurig lang doorgaan.
Anders gezegd: er gaat nu een elektrische stroom van links naar rechts door de kristaldiode. In het *N*-gebied wordt deze stroom gevormd door een (negatieve) elektronenstroom naar links en in het *P*-gebied door een (positieve) gatenstroom naar rechts. Op deze wijze geschakeld, is de diode wél geleidend. Hij kan dus werken als een ventiel, als een gelijkrichter. Sluit men de diode aan op een wisselspanning, dan zullen perioden van wel- en niet-geleidend zijn elkaar afwisselen. Er ontstaat nu hetzelfde als op blz. 6 van deel 2, Elektronenbui-



Fig. 19. Het symbool van een diode

zen, beschreven is voor de diodebuis: een scheutsgewijze stroom in één richting, een gelijkstroom. De kristaldiode kan de diodebuis dan ook met succes vervangen.
Als bijzonderheid noemen wij de fotodiode, die i.p.v. de fotocel gebruikt kan worden. Deze wordt steeds in de niet-geleidende stand aangesloten bv. op een zakbatterij van 4½ volt; in onbelichte toestand loopt er dan geen stroom door. Valt er nu licht op, dan zullen overal elektron-gatparen ontstaan, waardoor de ventielwerking verloren gaat. Er loopt nu een stroom waarvan de sterkte een maat is voor de sterkte van het opvallend licht.

De transistor

Om de werking van de transistor te leren begrijpen, nemen we een tweetal kristaldiodes D_1 en D_2 (fig. 20) en zetten deze zo, dat de *N*-gebieden tegen elkaar staan. Beter is het zo'n dubbele diode te vervaardigen uit één enkel kristal. Het resultaat is een zgn. *PNP*-kristal bestaande uit een *N* gebied, geflankeerd door twee *P*-gebieden.
Twee stroombronnen B_1 en B_2 worden zodanig aangesloten, dat in het gehele kristal de gaten naar rechts en de vrije elektronen naar links gestuwd worden. In de grenslaag G_1 zullen gaten en elektronen elkaar ontmoeten en recombineren; dit diode-deel is dus geleidend. Zelfs bij een kleine spanning van B_1, bv. van 0,1 V, zal er in de linkerketen een stroom lopen. Hoe groter deze spanning, hoe sterker de stroom is.

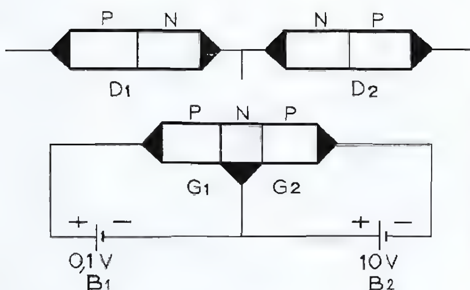


Fig. 20. Bouw van een transistor

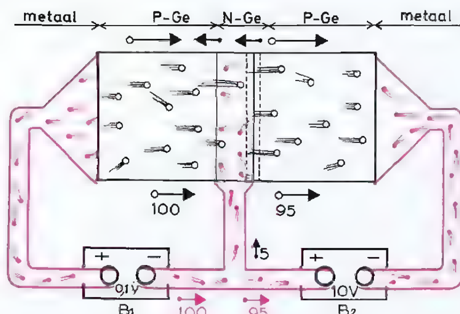


Fig. 21. Geleiding in een transistor

Rechts bij G_2 worden de ladingdragers door de aangelegde spanning juist van de grenslaag af gedreven; deze diode is dus niet-geleidend. Ook al maakt men de spanning van B_2 groot, b.v. 10 of 20 V, èen stroom zal er in het rechter circuit niet lopen. Het is van belang zich goed te realiseren *waarom* het *N*-gebied geen gaten bevat, ondanks het feit, dat er van links af een groot aantal instroomt. Elk gat zal namelijk in het *N*-gebied gekomen, spoedig een vrij elektron ontmoeten en daarmede recombineren. Het ene gat zal daarbij verder in het *N*-gebied doordringen dan het andere, doch tenslotte gaan ze alle ten onder. Dit wordt echter anders als het *N*-gebied zeer smal is. Bij de transistors is dit slechts enkele honderdste mm breed. In fig. 21 is dit gebied nog veel te dik getekend. De gaten uit het linker *P*-gebied doorlopen deze dunne laag in zo'n korte tijd, dat er nauwelijks gelegenheid is voor recombinatie door ontmoeting met een vrij elektron. Daar de recombinatiekans klein is, zullen er van elke 100 gaten die door G_1 het *N*-gebied binnenkomen, er bv. liefst 95 de laag G_2 heelhuids bereiken. De overige gaan verloren, tegelijk met vijf vrije elektronen waarmee ze recombineren. Het rechter *P*-gebied, door stroombron B_2 negatief geladen, zal deze 95 gaten aantrekken; zij hebben dan het gehele kristal doorlopen. In de transistor is dus ook de tweede diode geleidend geworden en wel doordat op heel bijzondere wijze gaten in het *N*-gebied ingebracht zijn. Bijzonder is ook het feit dat verandering van de spanning van B_2 de sterkte van de doorgaande stroom *niet* beïnvloedt; in het bovenstaande voorbeeld bv. blijft het aantal doorgestroomde gaten 95, ook al neemt die spanning toe.

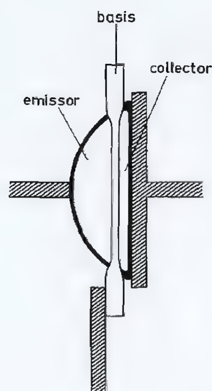


Fig. 22. Doorsnede door een transistor

Men noemt het linker *P*-gebied, dat de emissie (uitzending) der gaten veroorzaakt, de *emissor* en het rechter gebied, dat de gaten verzamelt, de *collector*. Daar tussen ligt de *basis*. Fig. 22 toont de doorsnede van een werkelijke transistor. Ook de stromen in de verschillende aansluitingen hebben een naam. In de linker aansluiting en door B_1 loopt de emissorstroom I_e, veroorzaakt door de gatenstroom in de emissor; in de rechterdraad en door B_2 gaat de collectorstroom I_c, een gevolg van de gatenstroom in de collector. Zoals we zagen is I_c iets kleiner dan I_e. De elektronen die in het *N*-gebied bij de recombinatie verdwijnen, worden aangevuld door een elektronenstroom in de middenaansluiting. Men noemt de hiermede overeenkomende, naar beneden gerichte elektrische stroom de basisstroom I_b. Gemakkelijk is in te zien dat $I_e = I_c + I_b$ (in het voorbeeld zien wij dit uit de aantallen: $100 = 95 + 5$).

De transistor als versterker

Fig. 23 geeft het principe weer van een transistorversterker. Als belastingweerstand R kan bv. een luidspreker L gedacht worden. De grootte van de doorgaande stroom $I_e \approx I_c$ (wij verwaarlozen hier I_b) hangt uitsluitend af van de spanning van B_1, die hier 0,1 V genomen is. Vallen nu geluidsgolven op de microfoon M, dan zal hierin een wisselspanning ontstaan, die bv. schommelt tussen +0,02 V en −0,02 V. Hierdoor zal de spanning tussen emissor en basis variëren tussen 0,1+0,02=0,12 V en 0,1−0,02=0,08 V. Dit heeft een variatie ten gevolge in I_e en een even grote in I_c. De door de luidspreker gaande stroom I_c wisselt dus in hetzelfde ritme als de geluidstrillingen die op de microfoon vallen. Is het geluid dat nu uit de luidspreker komt eigenlijk wel versterkt?

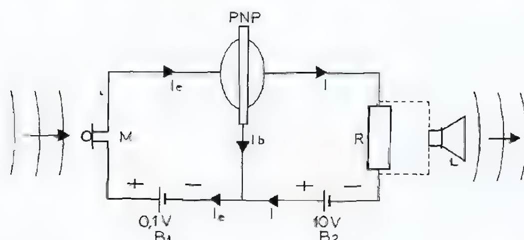


Fig. 23. Schakeling van een transistor als versterker

De transistor heeft de stroomvariaties, veroorzaakt door de microfoon, niet vergroot. Ze zijn zelfs iets kleiner geworden! Nu gaat het er echter in feite niet om of de (wissel)*stroom* door de luidspreker groter is dan die door de microfoon. Wel van belang is, dat de elektrische *energie* die de luidspreker opneemt groot is. De energie die per seconde overgedragen wordt, is nl. gelijk aan het produkt van de stroomsterkte door de luidspreker en het spanningsverschil dat nodig is om die stroom daar doorheen te laten gaan. Wil men met een transistor in deze schakeling, die dus geen stroomversterking geeft, toch een flinke energieversterking verkrijgen, dan zal men een grote waarde van de belastingsweerstand (een luidspreker met een grote impedantie) moeten nemen. Er is nl. veel spanning nodig om stroom door een grote weerstand te doen lopen. Voor het bereiken van een grotere spanning over de grotere belastingsweerstand is een grotere spanning van



Fig. 24. Symbool voor een PNP-transistor

B_2 nodig. We hebben reeds gezien, dat een toename hiervan de collectorstroom zelf niet beïnvloeden kan.
De werking van de transistor kan nu als volgt kort worden samengevat. Een kleine verandering in de spanning V_{eb}, veroorzaakt door de microfoon, zal een verandering in de doorgaande stroom $I_e = I_c$ ten gevolge hebben en dit veroorzaakt weer een grote spanningsverandering over de luidspreker. Deze spanningsversterking zal, ondanks het afwezig zijn van stroomversterking, toch een vergroting van de afgegeven energie met zich brengen. Ook hier is natuurlijk de stroombron B_2 de eigenlijke energiebron.
Door zijn versterkeffect is de transistor te vergelijken met de triode of pentode. In vele gevallen kan dit halfgeleiderprodukt de elektronenbuis met succes vervangen. Op de andere schakelmogelijkheden met transistors waarin bv. wel stroomversterking optreedt en op de *NPN*-transistor kunnen wij hier niet ingaan.

Voordelen

Reeds op het eerste gezicht valt op dat de halfgeleiderprodukten klein zijn: er zijn er die niet groter zijn dan een erwt. Ook de typen voor grote vermogens hebben aanzienlijk kleinere afmetingen dan de overeenkomstige elektronenbuizen. Deze kleinheid gaat samen met een klein gewicht van slechts enkele grammen. Dit alles maakt *miniaturisatie* van de elektronische apparaten mogelijk.
Daarbij komt dat, in tegenstelling met de buizen, geen gloeistroom nodig is om elektronen door warmte-effect vrij te maken, hetgeen voor hun besturing in buizen noodzakelijk is. De besturing van ladingdragers in halfgeleiders vindt in de stof zelf plaats. Veel van de toegevoerde gloeistroomenergie gaat bij buizen in de vorm van warmte nutteloos verloren. Er is (lucht)koeling nodig en dat vereist veel lege ruimte. Kristaldiodes en transistors behoeven geen gloeistroom en omdat ze bovendien kunnen werken bij veel lagere spanning (bv. 10 i.p.v. 200 V) kan met enkele kleine, in het toestel ingebouwde batterijen worden volstaan. Men is daardoor tevens afhankelijk geworden van het lichtnet. Omdat er geen gloeikatoden opgewarmd moeten worden, zal een toestel uitgerust met diodes en transistors, na het inschakelen ook direct werken. Daar tenslotte de halfgeleiderprodukten door hun constructie zeer schokvast zijn, ligt de toepassing in kleine draagbare

apparaten voor de hand. Overal waar men zuinig moet zijn met ruimte en energie, zoals in auto's, vliegtuigen of kunstmanen, past men ze bij voorkeur toe. Rekenmachines bevat ten duizenden elektronische ventielen, schakelaars, versterkers, enz. Met buizen uitgevoerd zouden ze heel groot worden en hinderlijk veel warmte produceren. Ook hier brengt de halfgeleider uitkomst.

Nadelen

Er zijn enkele nadelen; deze zijn echter door de ontwikkeling van bijzondere schakelingen praktisch geheel op te heffen. Wij zullen ons voornamelijk bepalen tot de invloed van de temperatuur. Zoals op blz. 8 verteld is, zullen in zuiver germanium bij stijgende temperatuur steeds meer elektron/gatparen gegenereerd worden door de kristaltrillingen. Dit gebeurt nu ook in *N*- én in *P* germanium. Op blz. 10 is verteld hoe het komt dat *N*-germanium bij kamertemperatuur praktisch alleen vrije elektronen bevat. Wordt dit nu verwarmd, dan komen er niet alleen steeds meer vrije elektronen bij, doch ook steeds meer gaten.

Ditzelfde geldt voor *P*-germanium. Bij verwarming bevat dit steeds meer vrije elektronen naast de vele gaten die er al wa-

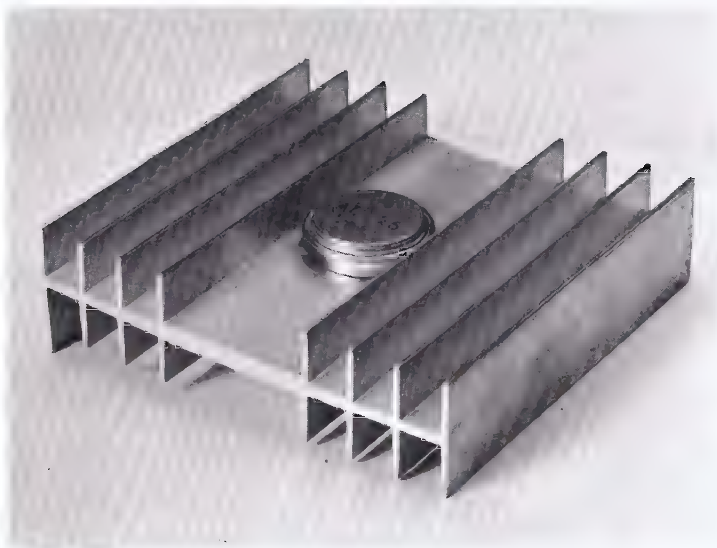


Fig. 25. Transistor voor groot vermogen met koelplaatje

ren. De conclusie is dat het typische onderscheid tussen *N* en *P*-germanium bij toenemende temperatuur steeds kleiner wordt, om tenslotte geheel te verdwijnen.
Het spreekt vanzelf dat de bijzondere effecten ontstaan door het contact van een zuivere elektronengeleider met een zuivere gatengeleider, verloren gaan. Er zullen lekstromen in de keerrichting optreden. Bij kamertemperatuur is er een geringe, niet hinderlijke lek. Doch een te warme kristaldiode richt helemaal niet meer gelijk en een te warme transistor versterkt niet meer.
Doordat de stroom in de halfgeleiders ook weerstand ondervindt, zal er net zoals in een gloeidraad, warmte in ontstaan. Men dient er dus voor te zorgen, dat de halfgeleiders in bedrijf niet te warm worden, bv. door montage op een metalen plaatje dat de warmte goed geleidt (fig. 25). Bij germaniumprodukten ligt de temperatuurgrens bij ongeveer 70 °C en bij siliciumprodukten bij ca 150 °C. De temperaturen waarbij blijvende beschadigingen optreden, bv. het smelten van contacten, liggen daar natuurlijk boven.
Een ander bezwaar was dat de halfgeleiders niet geschikt waren voor wisselstromen met hoge frequentie. Door een verdere verkleining van de afmetingen heeft men hieraan kunnen tegemoetkomen, zodat thans reeds toepassing mogelijk is bij de zeer hoge frequenties van de metergolven (zie de deeltjes „Frequentiemodulatie" en „Televisie").
De nadelen vallen dus nogal mee, de voordelen mogen er zijn. Een groot gebied ligt open voor de toepassing van de halfgeleiders.

Geïntegreerde schakelingen

Door de invoering van de kristaldiode en de transistor, met hun grote voordelen, is miniaturisatie van schakelingen en apparaten mogelijk geworden. Wel bleef het grote bezwaar bestaan dat nu ook elke schakeling samengesteld moest worden door montage op een drager van alle, afzonderlijk gefabriceerde onderdelen zoals weerstanden, condensators, diodes en transistors.
Een dergelijke montage is kostbaar, terwijl er, vooral bij de steeds ingewikkelder wordende schakelingen, verkeerde verbindingen gemaakt kunnen worden.
Nu is het mogelijk gebleken complete schakelingen in één ge heel te vervaardigen door een gecompliceerde reeks van ver-

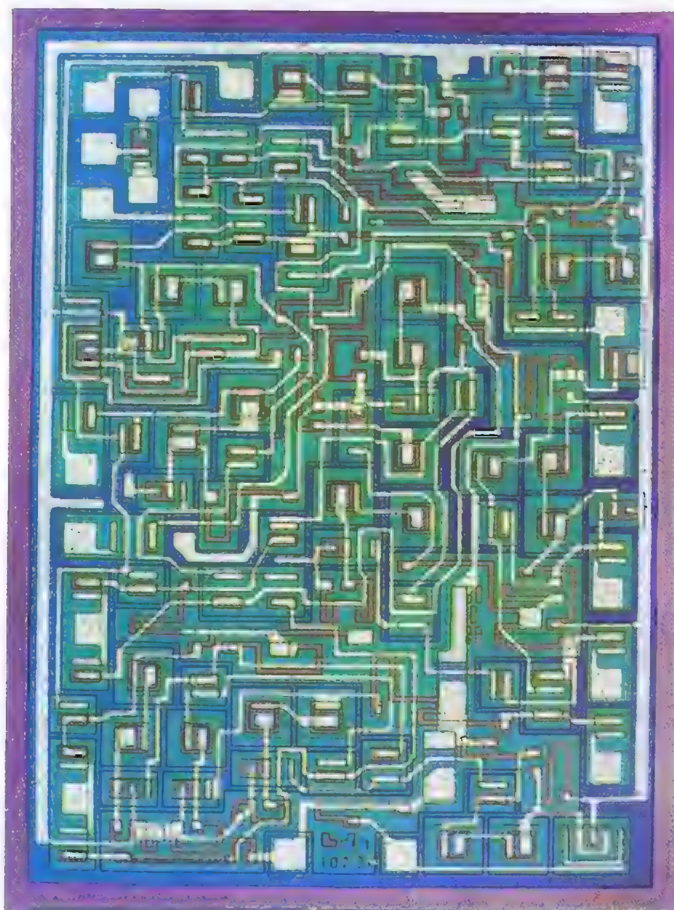


Fig. 26. Microfoto van een uitgebreide geïntegreerde schakeling. Ware grootte 2,1 × 2,6 mm. Deze schakeling vervangt 165 diodes, transistors en weerstanden

schillende handelingen. Daar elk benodigd onderdeel aanwezig is, noemt men dit een *geïntegreerde schakeling*.

Men gaat hierbij uit van een dun plaatje halfgeleidend silicium. De schakeling kan nu gefabriceerd worden door een aantal van de volgende handelingen:

a. Brengt men het plaatje bij hoge temperatuur in zuurstof, dan wordt de buitenlaag geoxydeerd tot het isolerende siliciumoxyde.

b. Brengt men het plaatje in fosfordamp, dan dringen fos-

foratomen het silicium binnen, waar zij als donor optreden. Er ontstaat dus *N*-silicium.

c. Gebruikt men broomdamp i.p.v. fosfordamp, dan ontstaat op overeenkomstige wijze *P*-silicium.

d. Door middel van verstuiving van een aluminiumdraad boven het plaatje in vacuüm, kan het plaatje bedekt worden met een laagje goed geleidend aluminium.

e. Evenzo kan men op het plaatje een nieuw laagje silicium aanbrengen door verstuiving in vacuüm.

Het interessante is dat al deze processen beperkt kunnen worden tot zeer bepaalde gebiedjes van het plaatje door het gebruik van maskers, die niet te bewerken gedeelten afdekken en afschermen. Verder kan men door etsen, waarbij ook een soort masker wordt gebruikt, bepaalde gedeelten van een aangebrachte laag verwijderen.

Door een combinatie van al deze handelingen, elk slechts op bepaalde plaatsen uitgevoerd, kan men op het plaatje waarvan men is uitgegaan, een reeks laagjes van het materiaal met verschillende eigenschappen krijgen. Aantal en aard van de laagjes varieert bovendien van plaats tot plaats. Op deze wijze ontstaan gebiedjes die zich gedragen als een weerstand of een condensator, als een diode of een transistor. Bovendien zijn alle „onderdelen" op de juiste wijze geleidend met elkaar verbonden.

De winst aan ruimte is onvoorstelbaar groot. Op een plaatje van 3 × 3 cm kan men 200 tot 2000 complete schakelingen verkrijgen. *Microminiaturisatie* is nu mogelijk! De toepassingen zijn beperkt tot schakelingen met gering vermogen die zich voor massaproduktie lenen en liggen vooral op het gebied van de elektronische rekenautomaten.

Besluit

Veel mogelijkheden zijn er reeds genoemd of aangeduid: zenders, ontvangers en andere apparaten in vliegtuigen, raketten en kunstmanen; autoradio's; zakradio's; draagbare zenders, ontvangers en bandopnemers; afstandbesturing van modellen; elektronische rekenmachines, enz.

Enkelvoudige en samengestelde halfgeleiders vinden o.m. daarin toepassing, ten dele als vervangers van de elektronenbuizen, ten dele met geheel nieuwe functies.

De halfgeleiding is een moeilijk onderwerp. Misschien heeft deze korte, zeer beknopte inleiding voldoende licht daarop laten vallen voor een beter begrip van deze moderne toepassing van de elektronica.

Woorden en begrippen

A acceptor . . . 11
atoombouw . . . 4 e.v.
atoomkern . . . 3
atoomsoorten . . . 4
B basis . . . 15
belastingweerstand . . . 15
buitenelektronen . . . 6
C collector . . . 15
contactpotentiaal . . . 12
convalente binding . . . 16
D donor . . . 10
doorlaatrichting . . . 13
E edelgas . . . 3
elektrische stroom . . . 9
elektronenbanen . . . 3
elektronenschillen . . . 3
elektronenstroom . . . 9
emissor . . . 15
energieversterking . . . 16
F fotocel . . . 14
fotodiode . . . 14
G gat . . . 8
gatenstroom . . . 9
geïntegreerde schakelingen . . . 19
generatie . . . 9
germanium . . . 7 e.v.
grenslaag . . . 13
H halfgeleiders . . . 2, 7 e.v.
I ion . . . 5
ionenbinding . . . 4
K keerrichting . . . 13
kristal . . . 2
kristaldiode . . . 11
kristalgelijkrichter . . . 2
kristalontvanger . . . 2
L lekstroom . . . 19
lichtgevoelige weerstand . . . 8
M magnesiumchloride . . . 5
maskers . . . 21
metaalbinding . . . 6
microminiaturisatie . . . 21

miniaturisatie 17
N natrium 5
natriumchloride 5
natriumfluoride 5
N-germanium 9
N-silicium 20
P periodiek systeem 4
P-germanium 10
P-silicium 20
PNP-kristal 14
R recombinatie 9
S silicium 2, 19
spanningsversterking 16
stroomversterking 16
T temperatuurgevoelige weerstand 7
temperatuurgrens 19
transistor . . . . 14 e.v.
V ventiel 12
versterker 16
vrije elektronen . . . . 5, 8 e.v.
Z zuurstof 6



PHILIPS NEDERLAND N.V. – EINDHOVEN
AFD. ONDERWIJSVOORLICHTING